

Análisis de Tiempos de Recombinación en Absorbedores Saturables

A. Hurtado Villavieja, A. González
Marcos, J.A. Martín Pereda
E.T.S.I de Telecomunicación
Universidad Politécnica de Madrid
c/Ciudad Universitaria s/n
28040-Madrid
Tfno.: 91 5495762 ext.425
Fax: 91 3367319.
E-mail: hurtado@tfo.upm.es

Áreas de interés: Óptica No Lineal
Palabras Clave: Biestabilidad Óptica,
Absorbedor Saturable, Tiempo de
Recombinación de Portadores.

1.- Introducción

Los dispositivos biestables ópticos son particularmente interesantes por el potencial de sus aplicaciones, tanto en el campo de procesamiento de señales digitales ópticas, en el cual las señales ópticas son procesadas directamente sin necesidad de conversión a señal eléctrica, como en el campo de las comunicaciones ópticas, especialmente en sistemas de conmutación.

Desde las primeras observaciones experimentales de la biestabilidad óptica[1-2] y las primeras aplicaciones de dichos dispositivos biestables para la realización de puertas lógicas[3], se ha venido haciendo un amplio estudio de los sistemas que emplean las no linealidades en semiconductores. El rango de las aplicaciones de estos dispositivos es múltiple, debido a la gran variación que puede experimentar, según cada caso particular, el tiempo de respuesta de los mismos. Podrán ser aplicados tanto en el campo de las telecomunicaciones, en el que prima una respuesta rápida de los dispositivos para dar servicio a la alta capacidad de transmisión de los sistemas, como también podrán ser aplicados en campos de actividad que requieran gran capacidad de procesamiento en paralelo y en los que prime sobre la velocidad de respuesta de los dispositivos, la cantidad de potencia óptica que necesiten para su funcionamiento.

Uno de los parámetros clave en el diseño y fabricación de los dispositivos biestables ópticos basados en las propiedades no lineales de los semiconductores es el tiempo de recombinación de portadores. Este parámetro es importante puesto que la densidad de portadores que se introduce a un dispositivo, como consecuencia de la aplicación de una fuente óptica externa, depende directamente de este tiempo. Por lo

tanto, influirá directamente en la cantidad de potencia necesaria para el funcionamiento de los dispositivos. Además, también tiene una influencia directa en el tiempo de respuesta, con lo que determinará también a qué velocidad podrá funcionar un dispositivo biestable bajo unas condiciones dadas.

El rango de tiempos de recombinación típico se encuentra comprendido entre 10 y 500ns, sin embargo, los tiempos pueden ser reducidos a menos de 1ns, con el coste que ello conlleva en lo que se refiere al aumento de intensidad óptica necesaria para alcanzar la misma densidad de portadores. Estos dispositivos denominados 'rápidos', debido a su bajo tiempo de respuesta, serán útiles para aplicaciones en el campo de las comunicaciones ópticas, como por ejemplo en sistemas de conmutación. De igual manera, el tiempo de recombinación puede ser aumentado, de modo que los dispositivos serán más 'lentos', pero necesitarán un menor nivel de intensidad óptica para su funcionamiento. Estos dispositivos serán útiles para aplicaciones de ultraparalelismo, como pueda ser por ejemplo el procesamiento de imágenes.

En el presente trabajo se realiza un estudio de la influencia del tiempo de recombinación de un dispositivo biestable, concretamente de un Absorbedor Saturable con estructura de Multi Quantum Well (Multi Pozos Cuánticos) en su interior, y de cómo este parámetro determina las características de la función de transferencia de este dispositivo en cuanto a lo que necesidades de potencia óptica y velocidad de respuesta se refiere.

2.- Descripción de la simulación realizada

2.a.- Descripción del circuito diseñado

Para el estudio de la influencia del tiempo de recombinación en el comportamiento de un dispositivo biestable, hacemos uso de la herramienta software VPIComponentMaker ActivePhotonics™. Realizamos para ello el esquema de simulación de la figura 1.

El circuito diseñado consta de tres partes diferenciadas. La primera corresponde a la etapa generadora de señal formada por un láser CW, un generador de señal eléctrica sinusoidal y un modulador óptico Mach Zender. El láser CW está configurado de tal forma que presenta una anchura espectral mínima a su frecuencia de emisión igual a 193.1e12Hz, frecuencia ésta que se encuentra dentro del rango de la tercera ventana de comunicaciones ópticas. La elección de esta frecuencia de emisión no es en absoluto casual, sino que corresponde al desafío de elevar la longitud de onda de operabilidad de los dispositivos biestables ópticos, para su

utilización en aplicaciones de comunicaciones ópticas, por ejemplo en sistemas de conmutación, existiendo a día de hoy algunos dispositivos capaces de operar a dichas frecuencias[4]. El generador de señal eléctrica proporciona una señal eléctrica de forma sinusoidal de 5Mhz de frecuencia. La salida de ambos componentes, el láser CW y el generador de señal eléctrico, entran al modulador óptico Mach Zender, del cual se obtiene ya a su salida, como consecuencia de la modulación externa de la señal del láser, la señal óptica sinusoidal de 5Mhz de frecuencia. Esta señal óptica generada será la que incida al dispositivo biestable y con la cual modelaremos su función de transferencia.

La segunda etapa la conforma el dispositivo biestable sobre el cual se centrará el estudio. Se trata de un Absorbedor Saturable, elemento que proporciona directamente la herramienta software y que en su documentación se describe como un elemento que presenta una alta absorción y cuya característica de absorción es lisa para todo el espectro[5].

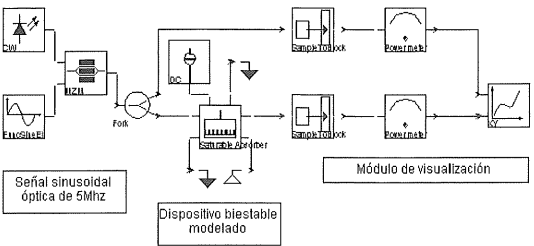


Figura 1. Esquema de simulación realizado

Acompañando al dispositivo biestable existe una fuente de corriente continua eléctrica para proporcionarle una corriente de Bias. Esta fuente ha sido incluida por necesidades propias del funcionamiento del programa, pero configurada de modo que su salida de corriente es cero, estará en estado inactivo. El dispositivo carecerá por tanto de polarización.

La tercera etapa fundamental de nuestro circuito se corresponde con el bloque de visualización de resultados, cuya misión es representar conjuntamente en un diagrama XY la potencia de entrada al Absorbedor Saturable en el eje de las abscisas y la potencia de salida del mismo en el eje de las ordenadas.

En la tabla 1 quedan resumidos de manera conjunta los valores de los parámetros utilizados durante el estudio. Las definiciones de los parámetros utilizados para la modelización y caracterización de los componentes definidos por la herramienta software[5], que serán utilizados para la elaboración de este estudio han sido realizadas en consulta con el grupo de investigación de la Unión Europea COST-240[6].

Parámetros utilizados en el Modelo	Valor
Longitud de onda nominal	m 1.55252e-6
Longitud de Chip	m 26x10e-6
Anchura de la región activa	m 2.5x10e-6
ActiveRegionThickness	m 0.04x10e-6
FactorConfinamiento_MQW	0.07
FactorConfinamiento_SCH	0.56
Índice Efectivo de Grupo	3.7
Reflectividades de las caras	0.7
Eficiencia de acoplamiento óptico	1
Pérdidas internas fijadas	1/m 3000
AnchoLineaMaterial_MQW	5
ÍndiceRefrDiferencial_MQW	m³ -1.11x10e-6
ÍndiceRefrDiferencial_SCH	m³ -1.5x10e-6
Coef.RecombinaciónLineal	1/s 1e10
Coef.RecombinaciónMolecular	m³/s 0
Coef.RecombinaciónAuger	m⁶/s 0
Coef.GananciaLinealMaterial	m² 25x10e-20
Dens.PortadoresTransparencia	1/m³ 10x10e24
Const.TiempoCapturaPortadores	s 70x10e-12
Const.TiempoEscapePortadores	s 140x10e-12
ParámetroInversiónPoblación	10e-5

*Parámetro relativo al tiempo de recombinación y objeto de estudio.

Tabla 1. Cuadro resumen de parámetros utilizados.

2.b.- Ecuaciones del modelo

El primer comienzo del análisis consiste en describir las ecuaciones sobre las que opera el modelo[5]:

$$dS/dt = v_g a \Gamma (N - N_0) [S / (1 + \epsilon S)] - (S / \tau_p) + B \Gamma \beta N^2 \tag{1}$$

$$dN/dt = -v_g a (N - N_0) [S / (1 + \epsilon S)] - R(N) + (I / q d L \omega) \tag{2}$$

donde: $R(N) = AN + BN^2 + CN^3$, representa el efecto de recombinación de portadores siendo A, B y C los coeficientes de recombinación lineal, bimolecular y auger respectivamente. S es la densidad de fotones dentro de la cavidad, v_g es la velocidad de grupo a lo largo de la cavidad, a es el coeficiente de ganancia lineal del material, Γ es la proporción de fotones que viajan por el interior de la región activa, N es la densidad de portadores en la región activa, N_0 es la densidad de portadores para transparencia, τ_p es el tiempo de vida del fotón, ϵ es el coeficiente de ganancia no lineal, β es el factor de acoplamiento de emisión espontánea, I es la corriente inyectada, q es la carga del electrón, d es el grosor de la región activa, ω es la anchura de la región activa y L es la longitud de la cavidad.

Ambas ecuaciones (1) y (2) describen la evolución de la densidad de fotones y de portadores respectivamente, promediadas en toda la cavidad. Al tratarse el dispositivo utilizado de un dispositivo con una estructura de Multi-Quantum Well, esta estructura queda descrita por una nueva ecuación que define la densidad de portadores dentro de la región SCH (Separate Confinement Heterostructure). Esta ecuación

representa la densidad de electrones en la cara-n SCH de los pozos (wells) que se asume que es igual a la densidad de huecos en la cara-p SCH.

$$\frac{dN_{SCH}}{dt} = [I / (q\omega d_{HalfSCH} L)] - (N_{SCH} / \tau_{capture}) + [(N_{MQW} / \tau_{escape})(d_{MQW} / d_{HalfSCH})] \quad (3)$$

donde: d_{MQW} corresponde al grosor total de todos los pozos cuánticos, $d_{HalfSCH}$ es el grosor de uno de los lados de la región SCH, $\tau_{capture}$ es la constante de tiempo de captura de los pozos y τ_{escape} es la constante de tiempo de escape de los pozos.

2.c.- Influencia del tiempo de recombinación

De acuerdo con lo expresado en [7], bajo la operación de un láser CW (Continuos Wave), se introduce al dispositivo una densidad de portadores N , que depende de la intensidad óptica I de la forma:

$$N = \alpha I \tau / h \nu; \quad (4)$$

donde τ es el tiempo de recombinación de portadores. Cuanto mayor sea el tiempo antes de la recombinación, menor será la intensidad óptica proporcionada por el láser CW para alcanzar la misma densidad de portadores. Este compromiso entre la velocidad y la intensidad es un aspecto clave en la actuación del dispositivo. El tiempo de recombinación depende de la densidad de portadores en la siguiente forma:

$$\tau^{-1} = A + BN + CN^2 \quad (5)$$

De las expresiones (2) y (5) se deduce que $R(N) = N/\tau$, lo que pone de manifiesto la influencia directa del tiempo de recombinación de portadores en la evolución temporal de la densidad de portadores dentro de la cavidad. Dado que el interés de este estudio se centra en la influencia global del tiempo de recombinación de portadores y no en la influencia particular que pueda tener cada una de las tres componentes que determinan dicho tiempo de recombinación (A , B y C), se anulan los valores de los coeficientes Bimolecular y Auger respectivamente y se actuará sobre el valor global del tiempo de recombinación del dispositivo mediante el control del valor del parámetro A , *Coefficiente de Recombinación Lineal*, con lo que se dispondrá de un valor de tiempo de recombinación constante y que se verá modificado en los sucesivos estudios.

Las figuras 2(a), 2(b), 2(c) y 2(d) muestran gráficamente las funciones de transferencia del dispositivo analizado para cuatro tiempos de recombinación de portadores diferentes del dispositivo. Los cuatro valores de tiempos de recombinación utilizados son respectivamente: 20ns ($A = 5 \times 10^7$ 1/s), 10ns ($A = 10^8$ 1/s), 1ns ($A = 10^9$ 1/s) y 0.1ns ($A = 10^{10}$ 1/s).

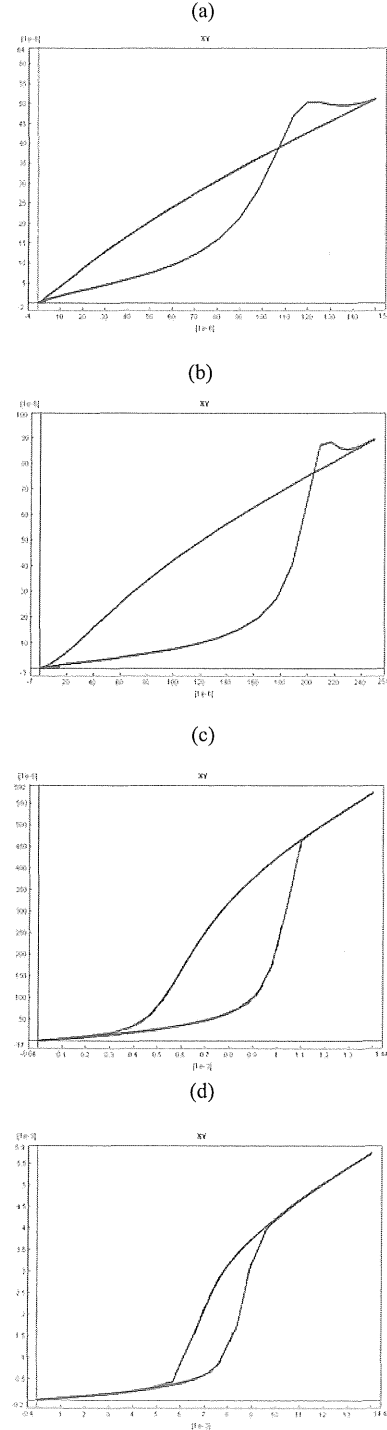


Figura 2. (a) $\tau = 20ns$ ($A = 5 \times 10^7$ 1/s), (b) $\tau = 10ns$ ($A = 10^8$ 1/s), (c) $\tau = 1ns$ ($A = 10^9$ 1/s) y (d) $\tau = 0.1ns$ ($A = 10^{10}$ 1/s).

Como era de esperar a partir de (4), el umbral de biestabilidad en cada caso, aumenta en un orden de magnitud cuando se disminuye en un orden de magnitud el valor del tiempo de recombinación (ver Tabla 2). Esta circunstancia se debe a que cuanto menor sea el tiempo de recombinación, mayor será el nivel de potencia óptica necesario para alcanzar una misma densidad de portadores, para la cual tendrá lugar la conmutación entre estados característica de los

dispositivos biestables. Sin embargo, también se deduce, que a medida que disminuye el tiempo de recombinación, disminuye la anchura del ciclo de histéresis asociado al fenómeno de biestabilidad óptica, aumenta la relación entre los dos distintos estados de salida y la conmutación entre estados se realiza de un modo más abrupto. Estos resultados, obtenidos como consecuencia de la disminución del tiempo de recombinación, redundarán en una mejora de la calidad de los dispositivos para su posterior aplicación, puesto que permitirán el manejo de señales multinivel, establecerán diferencias más claras entre los ‘ceros’ y ‘unos’ lógicos de salida del dispositivo, y sobre todo permitirán el funcionamiento de los dispositivos a mayores tasas de bit. Si bien queda claro, que se obtienen con una penalización en el nivel de potencia óptica necesario. En la tabla 2 se recogen de modo resumido los resultados numéricos obtenidos.

Tiempo de recombinación	20ns	10ns	1ns	0.1ns
Nivel de potencia Umbral (mW)	0.115	0.21	1.1	9.5
Nivel de potencia del estado alto (mW)	0.055	0.09	0.5	4.5
Anchura del ciclo de histéresis (mW)	0.115	0.2	0.8	3.5
% Anchura del ciclo de histéresis	100%	90%	73%	37%

Tabla 2: Cuadro de Resultados experimentales

A modo de ejemplo de cómo el tiempo de recombinación afecta a la velocidad de respuesta del dispositivo modelado, realizamos un experimento consistente en la introducción de una señal óptica de datos digital al dispositivo en dos casos: para un tiempo de recombinación de 0.1ns y 1ns. La tasa de bit será igual a 1.25Gbps en ambos casos y la amplitud de bit será igual a 1.5xNivel de potencia umbral necesario (14.25mW y 1.65mW respectivamente). Los resultados obtenidos se observan en las figuras 3(a) y 3(b).

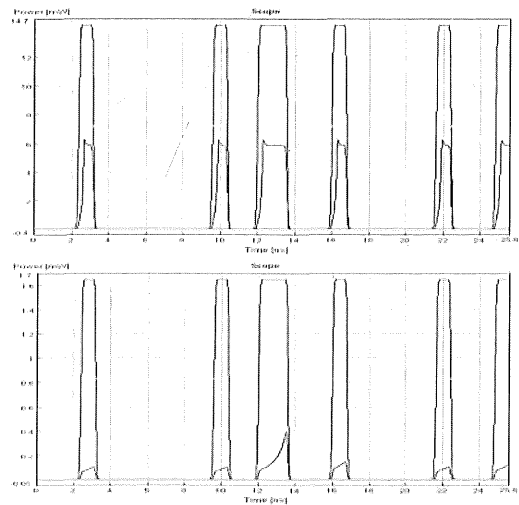


Figura 3: Señales de entrada y salida al dispositivo para: (a) $\tau = 0.1\text{ns}$ y (b) $\tau = 1\text{ns}$.

En las figuras 3(a) y 3(b) se pueden ver las señales de entrada y salida del dispositivo, y cómo en el caso en el que el tiempo de recombinación es menor, el dispositivo puede dar respuesta para esa velocidad de bit conmutando a estado alto su salida, mientras que al aumentar en un orden de magnitud el tiempo de recombinación, la respuesta del dispositivo no es lo suficientemente rápida para proporcionar una respuesta adecuada a tal velocidad.

3.- Conclusiones

En este trabajo se ha evaluado la influencia del valor del tiempo de recombinación de portadores en el comportamiento de un dispositivo biestable. Queda patente el compromiso existente entre la velocidad de respuesta alcanzable y la cantidad de potencia necesitada para el funcionamiento de estos dispositivos. Una elección adecuada de este parámetro determinará si un dispositivo podrá ser utilizado en aplicaciones de alta velocidad, o bien en aplicaciones que requieran poca potencia y alto grado de procesamiento en paralelo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por C.I.C.yT. y por la Comunidad Autónoma de Madrid-C.A.M. proyectos de investigación TIC99-1131 y 7T/0037/2000 respectivamente.

4.- Bibliografía

- [1] H.M. Gibbs, S.L. McCall, y T.N.C. Venkatesan, “Differential gain and bistability using a sodium-filled Fabry-Perot-interferometer”, Phys. Rev. Lett., vol. 36, pp. 1135-1138, 1976.
- [2] H.M. Gibbs, S.L. McCall, T.N.C. Venkatesan, A.C. Gossard, A. Passner y W. Wiegmann “Optical Bistability in Semiconductors” Appl. Phys. Lett., vol. 35, pp. 451-453, 1979.
- [3] H.M. Gibbs, “Optical Bistability: Controlling Light with Light”. Orlando, FL: Academic, 1985. Cap.2, pp. 19-93.
- [4] J.P. Debray, E. Lugnane-Delpon, G. Le Roux, J.L. Oudar, M. Quillec, “Low Threshold InGaAlAs monolithic vertical cavity bistable device at 1.55 μm ” Appl. Phys. Lett., vol. 70, pp. 2858-2860, 1997.
- [5] “VPIComponentMaker Active Photonics User’s Manual”.
- [6] G. Guekos, “Photonic Devices for Telecommunications”, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [7] E. Garmire, “Resonant Optical Nonlinearities in Semiconductors”, IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, pp. 1094-1110, 2000.